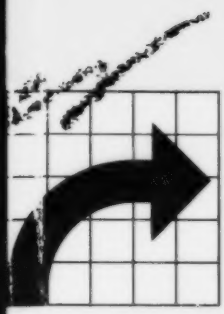
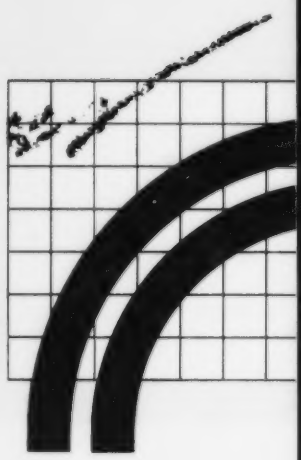
ÉTUDES ET
RECHERCHES
EN TRANSPORTS



ENQUÊTE DELPHI SUR LA PÉNÉTRATION DES MATÉRIAUX CÉRAMIQUES AVANCÉS DANS LES MOTEURS

DANIEL LEBLANC
MICHEL RIGAUD



ESSAIS
ET MATÉRIAUX

Québec

89-04703/

RAPPORT:

ENQUÊTE DELPHI SUR LA PÉNÉTRATION DES MATÉRIAUX CÉRAMIQUES AVANCÉS DANS LES MOTEURS

Préparé pour:

La Direction de la recherche
Ministère des Transports du Québec

Par:

Daniel LEBLANC
Département de génie industriel
École Polytechnique de Montréal

Et:

Michel RIGAUD
Département de génie métallurgique
École Polytechnique de Montréal

Août 1988

Dépôt légal, 3e trimestre 1988
Bibliothèque nationale du Québec
ISBN 2-550-18940-X

Gouvernement du Québec
Ministère des Transports

FICHE ANALYTIQUE DE RAPPORT

Titre et sous-titre du rapport
Enquête Delphi sur la pénétration des matériaux céramiques avancés dans les moteurs

N° du rapport Transports Québec
RTQ 88-01

Rapport d'étape ☐ Rapport final ☒ — An 87 Mois 12 Jour

N° du contrat

Auteur(s) du rapport
Daniel Leblanc - Michel Rigaud

Date du début d'étude 87 01 — **Date de fin d'étude** 87 12

Coût de l'étude
4 500$

Étude ou recherche réalisée par (nom et adresse de l'organisme)
Départements de génie industriel et de génie métallurgique, École Polytechnique de Montréal
Case postale 6079, succursale "A"
Montréal (QUÉBEC) H3C 3A7

Étude ou recherche financée par (nom et adresse de l'organisme)
Direction de la recherche
Ministère des Transports du Québec
1410, rue Stanley, 11e étage
Montréal (QUÉBEC)
H3A 1P8

But de l'étude, recherche et renseignements supplémentaires
A l'aide principalement d'une enquête Delphi, identifier les principales classes de matériaux céramiques et les pièces les plus susceptibles d'être "céramisées" dans les moteurs; identifier les orientations actuelles et futures de la recherche dans le domaine; réaliser une première évaluation des impacts qui découleront de l'adoption de ces nouveaux matériaux.

Résumé du rapport

L'enquête Delphi, à partir de laquelle les prévisions ont été établies, fut menée en mars et mai 1987 auprès de 48 experts de haut niveau des États-Unis, du Canada et d'Europe. Un consensus d'opinions a pu être dégagé après deux rondes. L'horizon privilégié est l'an 2000.

Les faits saillants de l'étude pour le scénario le plus probable sont les suivants:

- la consommation probable de matériaux céramiques avancés pour la fabrication des moteurs à l'échelle mondiale sera de l'ordre de 123 350 tonnes métriques en l'an 2000. Ce tonnage se répartira surtout entre le nitrure de silicium et les sialons pour les pièces de frottement, les pièces chaudes et les rotors (70 555 tonnes) et l'oxyde de zirconium pour les pièces de frottement et les pièces chaudes (21 390 tonnes). Ces prévisions sont notamment fondées sur un poids moyen de céramique avancée par moteur de 2,2 kg;

- parmi les pièces les plus susceptibles d'être "céramisées" se retrouvent les senseurs pour le contrôle de combustion, les convertisseurs catalytiques, les têtes de bougies, les pipes d'échappement, les rotors de turbo-compresseur et les pièces de frottement (guides, poussoirs, inserts).

- la substitution des aciers et autres alliages par des pièces en céramique avancée s'effectuera d'abord à partir des moteurs diesel. En l'an 2000 le poids moyen des céramiques avancées devrait être de 4,5 kg par moteur diesel comparativement à 1,5 kg pour les moteurs à combustion interne.

Nbre de pages	Nbre de photos	Nbre de figures	Nbre de tableaux	Nbre de références bibliographiques	Langue du document	Autre (spécifier)
55	----	---	11	----	☒ Français ☐ Anglais	

Mots-clés
- Matériaux avancés, céramiques avancées, moteur, moteur diesel, moteur à combustion interne, turbine à gaz, enquête Delphi, prévisions, automobile, camion.

Autorisation de diffusion
☒ Diffusion autorisée ☐ Diffusion interdite

Signature du directeur général — Date

V-1773 (85-05)

AVERTISSEMENT

Les opinions et les vues exprimées dans ce rapport sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles du ministère des Transports du Québec.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Mme Denise Fontaine, MM. Gilles Allard, Stateson Duplan et Martin Perreault pour leur aide dans la réalisation de cette enquête, ainsi que le ministère des Transports du Québec (Bureau de l'innovation et de la recherche) pour son soutien financier.

Ce travail a été rendu possible grâce à la participation bénévole et généreuse d'experts de qualité des secteurs industriels, gouvernementaux et universitaires aux États-Unis, en Europe et au Canada. Les auteurs leur en sont reconnaissants; ils demeurent toutefois les seuls responsables du contenu de ce rapport.

SOMMAIRE

Cette étude, qui porte sur la pénétration à l'horizon 2000 des matériaux céramiques avancés (M.C.A.) dans les moteurs des véhicules de surface, a permis d'identifier les principales classes de matériaux céramiques concernés et les pièces les plus susceptibles d'être céramisées, et d'évaluer les tonnages que cela impliquera pour chaque catégorie de produits, selon trois scénarios: optimiste, pessimiste et le plus probable.

Ces précisions reposent principalement sur une enquête Delphi entreprise auprès de 48 experts de haut niveau, des secteurs industriels, universitaires et gouvernementaux, aux États-Unis, en Europe et au Canada. Les faits saillants sont les suivants, selon le scénario le plus probable: 136 000 tonnes courtes (123 350 tonnes métriques) de M.C.A. seront requises en l'an 2000, dont 77 800 tonnes courtes (70 555 tonnes) de nitrures de silicium et sialons pour pièces de frottement, pièces chaudes et rotors, et 23 600 tonnes courtes (21 300 tonnes) d'oxyde de zirconium pour pièces de frottement et pièces chaudes.

La substitution des aciers et autres alliages par des pièces en céramique dans les moteurs s'effectuera par étapes progressives à partir des moteurs diesels. Il faut tenir compte des conséquences dès maintenant, à tous les niveaux; elles sont de nature à engendrer de nouveaux développements industriels significatifs, y compris au Québec.

TABLE DES MATIÈRES

AVERTISSEMENT v

REMERCIEMENTS vii

SOMMAIRE ix

1. MANDAT ET CADRE DE L'ÉTUDE 1

2. LES MATÉRIAUX CÉRAMIQUES AVANCÉS (M.C.A.) 3

3. MÉTHODOLOGIE 9

4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION 13

5. CONCLUSIONS 29

TABLEAUX

2.1 Propriétés des céramiques versus propriétés des métaux 4

2.2 Caractéristiques et utilisations des M.C.A. fonctionnels 5

2.3 Facteurs déterminants dans le choix des procédés technologiques actuels .6

4.1 Pourcentage des experts prédisant qu'un poids donné de M.C.A. sera utilisé en moyenne dans les véhicules en l'an 2000 15

4.2 Usage des M.C.A. 17

4.3 Pourcentage des experts prédisant qu'il y a une probabilité supérieure à 50 % que 50 lbs (2,27 kg) de M.C.A. au moins seront utilisées par type de moteur et de marché 18

4.4 Répartition des tonnages de M.C.A. par marchés pour l'estimé le plus probable 21

4.5 Classes et sous-classes des M.C.A. considérées comme très importantes ou importantes 23

4.6 Répartition des tonnages de M.C.A. par pièces et types de moteurs pour l'estimé le plus probable 24

4.7 Prévisions des tonnages de M.C.A. utilisés dans les moteurs en l'an 2000 (tonnes) pour l'estimé le plus probable 25

4.8 Importance des différents facteurs conditionnant la pénétration des M.C.A. dans les moteurs 26

ANNEXES

A. Liste des participants à l'enquête 33

B. Questionnaire de l'enquête avec intervalles interquartiles des réponses de la ronde 1 et résultats finaux 31

C. Résultats finaux détaillés 53

1. MANDAT ET CADRE DE L'ÉTUDE

La présente étude de prévision technologique porte sur la pénétration, à l'horizon de l'an 2000, des Matériaux Céramiques Avancés (M.C.A.) dans les moteurs des véhicules automobiles. Elle vise à:

- identifier les principales classes de matériaux céramiques concernées et les pièces plus susceptibles d'être "céramisées" dans les moteurs;
- identifier des orientations actuelles et futures de la recherche au Canada et aux États-Unis dans ce domaine;
- préparer une première évaluation des impacts qui découleront de l'adoption de ces nouveaux matériaux;
- conduire à des recommandations quant aux axes de recherche-développement à favoriser au Québec.

Les conclusions obtenues reposent sur une enquête Delphi entreprise auprès de 48 experts de haut niveau, des secteurs industriels, universitaires et gouvernementaux aux États-Unis, en Europe et au Canada. Cette enquête a été partiellement réalisée dans le cadre du cours "MU.645 - La prévision technologique", du programme d'études supérieures de l'École Polytechnique de Montréal, durant le semestre d'hiver 1987. Elle s'est déroulée sur une période de 9 mois et a été effectuée à l'intérieur d'un budget de 4 500 $. Un compte-rendu abrégé des résultats a été publié dans le "CUICAC-Newsletter" du "Conseil Université-Industrie des Céramiques Avancées du Canada", à l'automne 1987.

2. LES MATÉRIAUX CÉRAMIQUES AVANCÉS (M.C.A.)

Les M.C.A. comme l'alumine (Al_2O_3), le carbure de silicium (SiC), le nitrure de silicium (SI_3N_4), la zircone partiellement stabilisée (PSZ), les Sialons (Si, Al, O, N), etc., sont des matériaux inorganiques non métalliques. Ils sont aussi associés à d'autres matériaux dans les matériaux à matrice métallique ou entre eux dans les composites céramiques-céramiques. (On trouvera à la question 2 la liste des céramiques considérées dans l'enquête - Annexe B). Dans les applications fonctionnelles ou structurales, les M.C.A. sont généralement utilisés pour leur dureté, leur résistance à la chaleur, à la corrosion et à l'usure, et pour leur légèreté. Toutefois ils ont un défaut majeur: leur fragilité.

Le tableau 2.1 fait une comparaison des propriétés physiques de quelques matériaux et de M.C.A., le tableau 2.2 donne une liste des principales caractéristiques des M.C.A. en regard d'utilisations actuelles ou potentielles.

Les M.C.A. sont obtenus par agglomération de poudres très fines et ultra-pures dans des procédés de moulage par injection et frittage, pressage isostatique à froid et frittage, coulage à froid et pressage, projection avec plasma, etc. Étant donné la dureté des pièces obtenues, les opérations de finition (usinage, perçage, etc.) sont réduites autant que possible. De même, le choix des M.C.A. nécessite souvent des modifications au niveau du design et de l'assemblage des pièces. Ceci est parfois un inconvénient dans le cas des contacts avec d'autres matériaux ayant des coefficients de dilatation thermique différents ou des modules d'élasticité différents (problème des boulonnages par exemple). Ceci peut aussi être un avantage puisqu'on doit réaliser d'un seul bloc des pièces demandant habituellement l'assemblage de plusieurs composantes (cas des ailettes dans les turbines par exemple). De même, les techniques habituelles ne peuvent être utilisées pour le contrôle de qualité des pièces. Le tableau 2.3 dresse une liste des facteurs déterminants de choix dans les procédés actuels pour certains M.C.A.

Tableau 2.1 Propriétés des céramiques versus propriétés des métaux

Céramiques structurales: faible densité, haut module d'élasticité, faible ténacité

	MATÉRIAUX	Densité	Coefficient de dilatation thermique (10^{-6}/K)	Conductibilité thermique (W/mK)	Module d'élasticité (Gpa)	Rupture en traction/compression (MPa)	Ténacité (K1C) (MPa$\sqrt{m}$)	Résistance à la flexion à température ambiante (MPa)	Température d'utilisation maximale (°C)
MÉTAUX	Alliage d'aluminium	2,8	21	160	75	220	25	220	400
	Fonte grise	7,6	13	65	110	280	40	280	650
	Nimonic	8,3	15	20	210	1 100	90	1 100	1 000
CÉRAMIQUES	Carbure de silicium fritté	3,1	4,6	100	410	500/3 500	4,5	470	1 650
	Nitrure de silicium fritté par réaction	2,5	3,0	18	160	300/1 200	2,1	230	1 450
	Nitrure de silicium pressé à chaud	3,2	3,6	25	310	900/2 500	5	700	1 400
	SiAlON	3,2	4,1	20	290	600/3 000	5,4	460	1 450
	Zircone partiellement stabilisée	5,7	9,8	2,5	200	650/2 100	10	500	1 100
	Titanate d'aluminium	3,0	2,5	2	15	50/550	1	35	1 200

Source: Marc Ferretti, "L'aube des céramiques structurales", Sciences & Techniques, no 22, janvier 1986, p. 40.

Tableau 2.2 Caractéristiques et utilisations des M.C.A. fonctionnels

Caractéristiques	Matériaux	Utilisations
1. Propriétés mécaniques		
1. Résistance aux hautes températures	Nitrures	Turbines à gaz
2. Résistance aux frottements	Alumine, carbure de bore	Moteurs diesel
3. Résistance au cisaillement	TiC, TiN, CW	Outils de coupe
	Bore carboné	
4. Lubrifiant	Nitrure de bore	Lubrifiants solides
2. Propriétés thermiques		
1. Résistance thermique	Carbures, Nitrures, MgO	M.H.D.
2. Isolants thermiques	Oxyde de potassium, oxyde de titane, alumine, zircone	Fours industriels, écrans thermiques de centrales nucléaires
3. Conducteurs thermiques	Oxydes de bore, carbures, nitrure d'aluminium, alumine	Éléments de matériels électroniques, radiateurs
3. Propriétés électriques		
1. Résistance électrique	Alumine, carbures, oxyde de beryllium	Supports de semi-conducteurs
2. Piézo-électricité	Zirconates et titanates de plomb, Quartz, Niobates de lithium, Chromates de lanthane	Oscillateurs électriques — Dispositifs allumeurs
3. Conducteurs électriques	Zircone, Carbures	Résistances exothermiques, Condensateurs miniatures
4. Diélectrique	Titanate de beryllium, Titanate de strontium	Condensateurs haute tension
5. Conducteurs ioniques	Zircone, β-alumine	Détecteurs d'oxygène, électrolytes, solides
6. Semi-conducteurs	ZnO, Titanate de beryllium	Varistors, heaters, piles solaires, détecteurs de gaz
7. Émetteurs d'électrons	Borure de lanthane	Cathodes de canons à électrons
4. Propriétés magnétiques		
1. Qualité magnétique	Fe_2O_3, MnO,Fe_2O_3,BaO	Ferrites, enregistrement magnétique, mémoires
5. Propriétés optiques		
1. Transparence	Alumine, Oxyde d'yttrium, MgO	Lentilles optiques haute température, lampes à sodium
2. Transmission optique	SiO_2	Fibres optiques, caméras d'observation de l'estomac, détecteurs optiques
3. Polariseurs	Oxydes de zirconium, de titane, de plomb, de lanthane	Mémoires optiques (réversibles)
4. Fluorescence	Céramiques de terres rares et d'arseniure de potassium, verres de Nd:YAG	Lasers semi-conducteurs, diodes luminescentes
5. Photosensibilité	Verres d'argent halogénés	Verres pare-soleil, mémoires d'images
6. Fonctions biologiques	Alumine, Apatites	Dents et os artificiels
7. Propriétés chimiques		
1. Absorption	Silice multiporeuse, alumine, verres multiporeux	Adsorbants, catalyseurs, bio-réacteurs
2. Catalyseurs	Zéolites	Catalyseurs pour la protection de l'environnement
3. Anti-corrosion	Zirzone, SiO_2, Alumine	Électrodes pour la MHD, réacteurs haute température

Source: Service Scientifique de l'Ambassade de France au Japon, "le marché les nouveaux matériaux en l'an 2 000 au Japon". L'industrie céramique N° 793, No 4, 1985, p. 219.

Tableau 2.3 Facteurs déterminants dans le choix des procédés technologiques actuels

Propriétés	Facteurs de contrôle	État de la technologie
Réfractarité	• nature chimique des matériaux	• nitrures, borures, carbures, oxydes de Zr, Al, Si, Ti, Ce. • à améliorer la pureté des poudres
Résistance à la corrosion	• nature chimique • densité • température d'utilisation • procédé formage/frittage	• ZrO_2, Si_3N_4, Al_2O_3 • de 200 à 800-1200°C • dépôt en couche mince
Résistance à l'usure	• chimie • état de cristallisation • nouveaux lubrifiants	• SiC a un coeff. de frottement 1/5 de celui des métaux • SiN_4 bonne performance • dépôt en couche mince
Isolation thermique	• nature chimique • densité • épaisseur: — monolitique — insert — revêtement	• coeff. de conductibilité thermique <33 W/MK. Sauf pour SiC, coeff. = 100 W/MK • aug. de la température de combustion des gaz • diminue le combustible nécessaire
Allègement	• densité	• d des céramiques ≈3.5 g/cm³ • d des métaux >7 <12 gr./cm³ • AL = d = 2.8 g/cm³ • diminue l'inertie
Propriétés mécaniques	• chimie • état cristallin • densité • état de surface • réfractarité • état des poudres • procédés formage/frittage	• grandes variables selon les procédés • établir les dérivés pour mieux comprendre les interrelations • simulation sur ordinateur • redessiner les composantes • choisir le matériau approprié • procédés industrialisables

Source: "Les céramiques avancées dans la dynamique industrielle des transports", par G. Allart, D. Fontaine, G. Lafrance, S. Leith, rapport du cours MU.645, mai 1986, 195 pages.

Dans leurs applications structurales dans les moteurs, les M.C.A. permettent des augmentations de température et des réductions de poids qui entraînent des augmentations significatives de rendement énergétique et la suppression de certaines parties comme le système de refroidissement. Dépendant des scénarios, le degré et la nature de la céramisation varient beaucoup: ils vont de la céramisation complète à l'introduction de quelques pièces dans des usages critiques et contraignants pour les matériaux conventionnels. De même, différentes variantes de scénarios de céramisation reposent sur des évolutions au niveau des types de moteurs: moteur à combustion interne, diesel, turbine à gaz ou Stirling.

Il est important de noter qu'aucune céramique ne surpasse les autres et que les choix sont très dépendants des applications. Par exemple, les nitrures et les carbures ont de bonnes propriétés à hautes températures, ce qui les rend intéressants pour la turbine à gaz, mais la zircone a l'avantage d'une faible conductivité thermique qui la privilégie pour des usages d'isolation dans le diesel. Malheureusement, elle résiste encore assez mal aux chocs thermiques. Un objectif de ce travail est de quantifier par usage l'importance de ces différents M.C.A. pour les moteurs.

L'un des objectifs du questionnaire de l'enquête DELPHI est de préciser le scénario de céramisation des moteurs le plus plausible. Comme on le constatera à la section 4, l'hypothèse de la céramisation sélective des moteurs actuels est celle qui est privilégiée dans l'industrie. Les premiers éléments de réalisation sont d'ailleurs déjà en place chez plusieurs motoristes.

Le texte suivant du Professeur Philippe Boch*, de l'École nationale supérieure de céramique industrielle de Limoges, résume plusieurs de ces applications.

❹ OÙ EN EST AUJOURD'HUI LA CÉRAMISATION DES MOTEURS?

Le second colloque international sur l'emploi des céramiques dans les machines thermiques (Lübeck, avril 1986) et le troisième colloque international sur la zircone (Tokyo, septembre 1986) ont permis de faire le point sur la situation actuelle de la céramisation des pièces mécaniques de moteur. (L'utilisation croissante des céramiques dans les capteurs contrôlant le fonctionnement d'un moteur — par exemple, la composition des gaz d'échappement — a également été abordée, mais elle dépasse le cadre de cet article.)

Voyons d'abord les applications «grand public». En 1981, le motoriste japonais Isuzu a commencé à intégrer dans ses moteurs diesel des bougies de préchauffage en nitrure de silicium puis, en 1983, des bas de préchambre diesel en nitrure de silicium dans son modèle de voiture baptisé «Aska». Ces pièces, mises au point par le céramiste japonais Kyocera, permettent de réduire la durée d'inflammation et le bruit au démarrage à froid. Toyota a suivi l'exemple en 1984, en dotant son modèle «Crown» d'un bas de préchambre diesel en nitrure de silicium, mis au point par le céramiste japonais NGK. Cette même année, Porsche a équipé son modèle «turbo 944S» de pipes d'échappement en titanate d'aluminium Al_2TiO_5, mises au point par le céramiste allemand Hoechst-Ceramtech. Elles permettent de réduire les contraintes thermiques dans la culasse, d'améliorer le rendement du système de dépollution catalytique au démarrage et aux bas régimes, ainsi que le rendement du turbocompresseur. Ce modèle est également doté de pièces de turbocompresseur en zircone partiellement stabilisée (mises au point par la société allemande Feldmühle).

En 1985, le motoriste japonais Nissan dote son modèle «Fairlady» d'un rotor de turbocompresseur en nitrure de silicium, mis au point par NGK. Ce rotor céramisé entraîne une réduction du temps de réponse à l'accélération, une amélioration de la suralimentation à bas régime et une réduction de la masse du turbocompresseur. Le moteur peut aussi fonctionner à température plus élevée. Enfin, en 1986, Mazda équipe des moteurs d'une préchambre entière diesel en nitrure de silicium, également mise au point par NGK. La société Ford achète cette pièce, qui permet de réduire l'émission de poussières de combustion, pour la monter sur certains de ses modèles «Escort» et «Links».

Cependant, la céramisation ne concerne pas exclusivement les pièces chaudes des moteurs; elle s'applique également aux pièces frottantes. Ainsi Mitsubishi teste depuis 1984 des patins de culbuteurs en nitrure de silicium sur son modèle «Galant». Mis au point par NGK, leur usure est réduite et leur durée de vie augmentée à haut régime. D'autre part, le couple d'entraînement du moteur à bas régime est amélioré grâce à ces pièces.

En ce qui concerne les applications militaires, les renseignements sont parcellaires. Les efforts les mieux connus sont ceux de la société Cummins, qui étudie aux États-Unis un moteur alternatif à isolation thermique renforcée à l'aide, en particulier, de revêtements de zircone.

Voilà donc quelles sont aujourd'hui les pièces céramiques fonctionnant réellement dans des moteurs. Il s'agit dans tous les cas de séries limitées — quelques dizaines de moteurs par jour — pour des modèles haut de gamme. Toutes les pièces sont contrôlées avant montage.

La plupart des motoristes ont, par ailleurs, des programmes expérimentaux. En particulier, Renault et Peugeot en France, Volkswagen (moteur alternatif) et Mercedes (moteur turbine) en RFA, Volvo en Suède, Ford (moteur turbine) aux États-Unis. Des études sont également menées, notamment en France par le CEMT (Centre d'études des machines thermiques), sur les moteurs marins et les turbines de production électrique. Mais il est incontestable que c'est au Japon que les programmes sont les plus nombreux... et expliqués avec le plus de publicité!

Citons pour finir les programmes européens EURAM (European Research Program on Advanced Materials), dont plusieurs thèmes concernent la céramisation des moteurs, et le programme EUREKA. Le premier a pour but de coordonner les efforts européens pour la mise au point et l'étude de nouveaux matériaux. En ce qui concerne le second, on relève, parmi les quarante projets auxquels participent les entreprises françaises, trois projets d'une durée de cinq ans concernant la céramisation des moteurs: «Nouveaux matériaux pour moteurs d'automobiles», dont le financement s'élève à quinze millions d'écus, «Utilisation des céramiques dans les turbines à gaz» (seize millions d'écus) et enfin «Céramique pour moteur diesel» (quatorze millions d'écus).

Source : Philippe Boch, "Céramiques thermomécaniques", La Recherche, no 185, février 1987, p. 175.

---

* Le Professeur Philippe Boch fait partie des experts européens ayant répondu à l'enquête (voir annexe A)

3. MÉTHODOLOGIE

La méthode DELPHI est une technique d'enquête permettant de générer des prévisions quantifiées à partir d'avis d'experts. Elle est particulièrement appropriée lorsque la nouveauté, ou des ruptures de structures dans l'évolution d'un phénomène, ne permettent pas de se baser sur des séries chronologiques pour faire des prévisions. Ces situations sont fréquentes dans le domaine de la prévision à long terme et plus particulièrement pour ce qui est des changements technologiques majeurs.

L'enquête DELPHI est une méthode itérative dans laquelle les experts sont appelés à fournir des estimés sous forme quantifiée et à les réviser sous le couvert de l'anonymat.

Les révisions sont demandées en leur fournissant des informations sur l'étendue des réponses du groupe (généralement l'intervalle interquantile) et sur les arguments et commentaires reçus à l'étape précédente. Cette façon de faire favorise la convergence rationnelle des opinions lorsqu'il n'y a pas de divergences profondes et réelles entre groupes d'experts. En effet, l'anonymat assure que cette convergence n'est pas le résultat de relations d'influences interpersonnelles (hiérarchie, réputation, etc.) mais d'une normalisation des évaluations. De même, ceci permet de cristalliser les divergences, lesquelles fournissent souvent des informations sur les points controversés, indéterminés ou équiprobables dans l'évolution du phénomène. Complémentairement, l'unimodalité et le centrage de la distribution sont des indicateurs sur la fiabilité de la prévision obtenue. Ainsi, des simulations ont montré que plus les estimés initiaux sont centrés, plus la fiabilité de la prévision augmente. D'autres techniques, comme les interviews structurées, permettent d'obtenir également des résultats intéressants lorsque l'on doit se baser sur des avis d'experts pour effectuer des prévisions. L'enquête DELPHI a toutefois l'avantage de permettre l'accès à un bassin d'experts plus large à un coût moindre.

Le choix de l'échantillon est crucial et pose des problèmes difficiles à résoudre dans la pratique. D'une part, la composition de l'échantillon doit représenter les différentes tendances ou points de vues qui influenceront l'évolution du phénomène (il est en effet fréquent que les experts soient des acteurs de l'évolution du phénomène étudié). D'autre part, l'identification et l'accessibilité aux experts et décideurs sont souvent difficiles pour des raisons

évidentes de disponibilité ou de confidentialité dans un contexte de concurrence économique. Il est dès lors nécessaire de rééquilibrer fortement l'échantillon a posteriori, lors de l'interprétation des résultats, et non a priori, lors de la composition du panel de répondants comme c'est habituellement le cas dans les techniques de sondage. De plus, la taille relativement restreinte de l'échantillon ne permet pas facilement les inférences statistiques habituelles. Il est important de noter que cette pondération des résultats est donc en fait plus une interprétation par les responsables de l'étude, compte tenu de leur perception du phénomène, qu'une opération statistique.

La présente enquête a fait appel à 48 experts de haut niveau des États-Unis (19), du Canada (10) et de l'Europe (19) appartenant à différentes sphères de l'industrie (utilisateurs potentiels et/ou producteurs de M.C.A.), de l'Université et des pouvoirs publics. La liste est donnée à l'Annexe A. La construction du questionnaire a aussi des biais semblables. On ne peut en effet demander aux experts de faire une prévision quantifiée de tous les paramètres de l'évolution d'un phénomène. Le questionnaire a pour but d'obtenir seulement des prévisions ponctuelles qui seront associées à d'autres sources d'information pour fournir un scénario complet et cohérent d'évolution. Les choix qui sont faits dans le questionnaire sont donc fonction de l'information a priori dont disposent ceux qui réalisent l'enquête.

Dans la présente enquête, le questionnaire (annexe B) portait sur des points généraux habituellement décrits comme pouvant influencer la pénétration des M.C.A. dans les moteurs (questions 1 et 6). Les auteurs pensent que ces remarques sur la fiabilité et la production de masse des M.C.A., la pollution, etc., ont des niveaux de pertinence différents selon le degré envisagé en céramisation des moteurs.

Les autres questions visaient à évaluer de façon plus précise le type de céramisation prévu par les experts. Elles portaient sur l'évolution des moteurs selon les secteurs, le type de M.C.A. qui sera utilisé et les parties susceptibles d'être céramisées. Des estimés de volumes étaient aussi demandés afin de compléter et valider la cohérence générale des réponses.

Comme on le constatera à la lecture des résultats interprétés (section 4) et bruts (annexe C), un fort consensus s'est dégagé sur un scénario de céramisation sélective des moteurs dans leur design actuel, que ce soit en Europe ou en Amérique du Nord.

Deux rondes seulement ont été nécessaires pour dégager ce consensus. Les différences observées entre experts s'expliquent assez bien à partir des dynamiques de marchés (Europe vs Amérique du Nord) et des contraintes vécues dans leurs fonctions (industriels vs chercheurs).

4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Les résultats finaux détaillés pour l'ensemble du panel, par région et par profil, sont présentés sous forme de tableaux de fréquence pour chacune des questions dans l'annexe C.

On trouvera dans la présente section une synthèse des résultats et leur interprétation. On y met également en évidence les différences provenant de la localisation et de la fonction des experts. Les regroupements suivants ont été effectués:

(Σ) ensemble des experts (48) qui constitue la base de comparaison;
(E) experts (19), provenant d'Allemagne de l'Ouest, de Grande-Bretagne, de France, de Suède et de Suisse;
(A) experts des États-Unis (19);
(C) experts canadiens (10);
(R) chercheurs et experts du domaine public, experts ayant une adresse postale dans un gouvernement ou une université (16);
(I) industriels (32), experts ayant une adresse postale dans une entreprise.

Des prévisions du tonnage de M.C.A. consommés ont été faites pour évaluer l'importance du phénomène de substitution en volume et en valeur. À cette fin, on a retenu une production mondiale annuelle d'environ 30 millions de voitures équipées d'une technologie avancée-standard (c'est-à-dire dont le moteur est susceptible d'être céramisé) et une production de 9 millions de véhicules utilitaires civils (camion et autobus) et militaires, pour 1985.

Prenant en considération la croissance démographique, l'augmentation du taux de possession des véhicules et la demande de remplacement, on a retenu un taux de croissance annuel moyen de 2,5 % du parc automobile susceptible d'être céramisé. Le même taux de 2,5 % a été retenu pour les véhicules utilitaires et militaires dont le moteur est susceptible d'être céramisé en l'an 2000. D'après ces hypothèses, on obtient un total de 56,5 millions de moteurs susceptibles d'être céramisés, dont 43,5 millions dans les automobiles et 13 millions dans les véhicules utilitaires et militaires. À noter que le taux de croissance du marché des M.C.A. durant la période 1985-2000 est la composition du taux de croissance des parcs de véhicules et du taux de substitution des pièces en M.C.A. dans les moteurs; le taux de croissance de ce marché sera donc nettement plus élevé que celui du marché des moteurs.

Avec ces projections de marché pour les moteurs, on peut calculer les quantités de M.C.A. utilisées dans les moteurs en l'an 2000 à l'aide des réponses des experts synthétisées dans le tableau 4.1.

En faisant l'hypothèse que chaque expert ne se trompe pas sur la base de son évaluation et qu'il représente une réalisation possible et équiprobable de l'évolution de la pénétration, on peut calculer une espérance mathématique des quantités de M.C.A. qui seront utilisées dans les moteurs à l'horizon de l'an 2000. Ces quantités seront calculées pour les scénarios optimiste, pessimiste et le plus probable. Méthodologiquement, on fait l'hypothèse que le caractère aléatoire de la pénétration provient des réalisations de l'environnement, lui-même aléatoire; les différences d'opinions entre experts proviennent donc d'hypothèses différentes sur cet environnement et non de leur niveau d'évaluation. La fréquence de chaque réponse peut être alors interprétée comme la probabilité résultante de différents états aléatoires de l'environnement du phénomène (marchés, paramètres techniques, etc.). On suppose ainsi que deux experts qui auraient la même appréciation de cet environnement donneraient la même réponse. Par contre, la même réponse ne signifie pas que deux experts ont la même vision de l'environnement puisque deux états différents de cet environnement peuvent conduire à la même solution. En d'autres termes, nous utilisons ici une méthodologie semblable à celle des simulations de Monte Carlo dans laquelle chaque expert serait un état de l'environnement mais en plus donnerait sa conséquence sur l'évolution du phénomène étudié. N'ayant pas d'information sur la "vraisemblace statistique" de chaque expert, nous faisons un tirage selon une distribution uniforme.

En utilisant cette méthode, on est à même de calculer l'espérance mathématique des consommations moyennes de M.C.A. en l'an 2000:

estimé optimiste: 20 lbs*.11 + 10 lbs*.70 + 5 lbs*.10 + 1 lb*.09 = 9,79 lbs
estimé pessimiste: 5 lbs*.05 + 1 lb*.95 = 1,20 lbs
estimé le plus probable: 10 lbs*.16 + 5 lbs*.60 + 1 lb*.24 = 4,84 lbs

soit respectivement 4,44 kg, 0,54 kg et 2,20 kg.

À partir des estimés de production de véhicules, on obtient des productions totales de pièces de M.C.A. de 274 000 tonnes courtes (248 500 tonnes métriques) pour l'estimé optimiste, 33 900 tonnes courtes (30 750 tonnes métriques) pour l'estimé pessimiste et 136 000 tonnes courtes (123 350 tonnes métriques) pour l'estimé le plus probable en 2000. À ces estimés de consommation de piè-

Tableau 4.1 Pourcentage des experts prédisant qu'un poids donné de M.C.A. sera utilisé en moyenne dans les véhicules en l'an 2000 (estimé optimiste, pessimiste et le plus probable).

EN 2000	POURCENTAGE SELON LE GROUPE					
QUANTITÉS EN LIVRES PAR VÉHICULE	Σ	E	A	C	R	I
ESTIMÉ OPTIMISTE						
1 livre par véhicule (0,45 kg)	100	100	100	100	100	100
5 livres par véhicule (2,27 kg)	91	89	100	83	100	88
10 livres par véhicule (4,54 kg)	81	71	87	83	86	80
20 livres par véhicule (9,08 kg)	11	20	0	25	14	9
ESTIMÉ PESSIMISTE						
1 livre par véhicule (0,45 kg)	95	88	100	100	86	100
5 livres par véhicule (2,27 kg)	5	12	0	0	14	0
10 livres par véhicule (4,45 kg)	0	0	0	0	0	0
ESTIMÉ LE PLUS PROBABLE						
1 livre par véhicule (0,45 kg)	100	100	100	100	100	100
5 livres par véhicule (2,27 kg)	76	57	87	83	71	80
10 livres par véhicule (4,54 kg)	16	17	25	0	29	8
20 livres par véhicule (9,08 kg)	0	0	0	0	0	0

ces finies en M.C.A. correspondent des consommations beaucoup plus élevées de poudres de M.C.A. On obtient actuellement des rendements de l'ordre de seulement 25 % et on fait généralement l'hypothèse de rendements de l'ordre de 70 % à la fin du siècle. Ce facteur de rendement est donc très important si l'on veut évaluer les débouchés dans le domaine des moteurs de véhicules pour les poudres de M.C.A.

On constatera au tableau 4.8 que ces paramètres de rendements (contrôle de la qualité, etc.) constituent en fait un frein important pour la pénétration des M.C.A. dans les moteurs.

Les estimés obtenus sont du même ordre de grandeur que ceux actuellement présentés dans le milieu. Avec une méthodologie différente, High Tech. Material Alert[1] prévoyait, en juillet 1987, une fourchette de 93 000 à 142 000 tonnes courtes (84 350 à 128 790 tonnes métriques) de M.C.A. consommées dans les moteurs pour l'an 2000. Il est intéressant de noter que notre estimé plus probable se situe dans cette fourchette.

En fait, nos estimés pessimistes et optimistes fournissent des scénarios d'encadrement alors que la fourchette de High Tech. Material Alert est un intervalle de confiance pour la valeur la plus probable. L'écart entre ces scénarios pessimistes et optimistes est grand. Il indique que beaucoup d'inconnues subsistent relativement à l'implantation généralisée des M.C.A. dans les moteurs. Ce point de vue sera repris lors de la discussion du tableau 4.3. Nous verrons quels types d'échéanciers de céramisation ceci suppose.

Au niveau des applications spécifiques, les résultats proviennent des réponses aux questions 4 et 3. Le tableau 4.2 dresse un résumé de ces usages en leur attribuant un degré de certitude. On y constate que seuls trois usages des M.C.A. sont quasi certains: les senseurs pour les contrôles de combustion, les convertisseurs catalytiques et les têtes de bougies. À noter que l'on parle ici de poids unitaires faibles. Pour les utilisations fortement probables, on a séparé les moteurs conventionnels (essence et diesel) des turbines à gaz.

---

[1] High Tech. Materials Alert Market Forecast "Key Advanced Ceramic Markets - (Part 1)", juillet 1987, p. 5.

Tableau 4.2 Usage des M.C.A.

TYPES D'APPLICATION	POURCENTAGE SELON LE GROUPE					
	Σ	E	A	C	R	I
UTILISATION QUASI CERTAINE						
Contrôle de la combustion - senseurs	83	92	91	50	87	82
Convertisseurs catalytiques	83	92	82	66	87	82
Bougies	69	75	73	50	100	59
UTILISATION FORTEMENT PROBABLE						
a) Moteur conventionnel (interne + diesel)						
- pipe d'échappement, rotor	96	92	100	100	87	100
- pièces de frottement (guides, poussoirs, inserts)	90	100	92	67	100	86
- composants pour adiabatisation	36	33	45	17	37	34
b) Turbine à gaz						
- roulements et joints	70	73	75	50	88	61
- composantes de turbine - rotors - stators	62	55	58	83	77	57
- chambre de combustion	57	60	67	33	77	50
- régénérateur	55	72	57	17	67	47
UTILISATION PEU PROBABLE						
- moteur Stirling - combustion	63	83	50	60	67	64
- moteur Stirling - isolation	58	67	50	60	50	64
- batterie ($Al_2O_3 - \beta$)	42	50	40	33	14	50

Tableau 4.3 Pourcentage des experts prédisant qu'il y a une probabilité supérieure à 50 % que 5 lbs (2,27 kg) de M.C.A. au moins seront utilisées par type de moteur et de marché

MARCHÉS ET MOTEURS	POURCENTAGE SELON LE GROUPE					
	Σ	E	A	C	R	I
VÉHICULES MILITAIRES						
- Combustion interne essence	20	25	18	16	50	11
- Combustion interne carburants alternatifs	14	17	11	16	33	6
- Diesel	85	89	83	83	78	90
- Turbine à gaz	48	71	42	33	78	35
- Stirling	0	0	0	0	0	0
CAMIONS ET AUTOBUS						
- Combustion interne essence	29	62	10	16	37	29
- Combustion interne carburants alternatifs	5	13	0	0	16	0
- Diesel	58	70	50	50	50	63
- Turbine à gaz	17	47	0	0	25	12
- Stirling	0	0	0	0	0	0
AUTOMOBILES						
- Combustion interne essence	24	40	20	0	43	20
- Combustion interne carburants alternatifs	0	0	0	0	0	0
- Diesel	41	60	27	33	62	35
- Turbine à gaz	8	28	0	0	14	5
- Stirling	0	0	0	0	0	0

On constate que dans les moteurs conventionnels, les parties chaudes et les pièces de frottement, poussoirs et inserts constitueront le gros du tonnage. Seulement 36 % des experts considèrent fortement probable l'utilisation à des fins adiabatiques des M.C.A. dans le moteur diesel d'ici 2000, alors que 96 % (100 % en Amérique du Nord et 92 % en Europe) prévoient leur usage pour les pipes d'échappement, les rotors des turbocompresseurs, et 90 % dans les pièces de frottement. À signaler que les rotors des turbocompresseurs, qui sont considérés souvent comme quasi certains, ne représentent qu'une toute petite fraction (de l'ordre de 2 %) du poids, relativement aux pièces de frottement et aux parties chaudes du moteur.

Pour les turbines à gaz, on retient comme fortement probables les roulements à billes et les joints d'étanchéité, les composantes des turbines, les éléments de la chambre de combustion et les régénérateurs.

Finalement, les applications dans les moteurs Stirling et les batteries à électrolyte solide sont écartées comme ayant une faible probabilité d'occurrence.

Les résultats précédents doivent être pondérés par les types de moteurs qui seront utilisés à la fin du siècle. Le moteur à combustion interne à essence restera dominant, suivi par le moteur diesel classique. Le moteur diesel adiabatisé représentera une petite fraction du total, alors que la turbine à gaz peut faire son apparition au niveau commercial dans les camions vers l'an 2000. Le moteur Stirling semble devoir être éliminé à cette époque-là.

Les réponses à la question 3, telles que résumées dans le tableau 4.3, permettent de classer les différents créneaux marché-moteurs en ce qui a trait à l'intensité de la céramisation.

Si on retient l'opinion de l'ensemble des experts (Σ) pour identifier les créneaux où la probabilité d'utiliser plus de 5 livres de M.C.A. par unité est supérieure à 50 %, on obtient le classement suivant:

1. moteur diesel pour véhicules militaires (85 % des experts);
2. moteur diesel pour camions et autobus (58 % des experts);
3. turbine à gaz pour véhicules militaires (48 % des experts);
4. moteur diesel pour automobiles (41 % des experts).

On peut interpréter ce classement comme une séquence de diffusion des M.C.A. dans les moteurs: d'abord le moteur diesel dans les véhicules militaires, puis

dans les camions et enfin dans les automobiles. Dans cette séquence, on passe du marché le plus étroit, mais pouvant supporter des coûts unitaires élevés, au marché le plus large, où la concurrence par le prix est forte.

Il y a consensus entre experts européens et américains sur ce classement. Il est toutefois intéressant de noter que les Européens sont plus optimistes en général que les Nord-Américains. Étant donné que la pénétration des moteurs diesels est plus forte dans les marchés européens, ceci renforce la vraisemblance du classement obtenu. Notons également que 62 % des experts européens voient aussi le moteur à essence des camions comme un candidat probable.

Les résultats obtenus ici peuvent être comparés avec ceux obtenu précédemment pour les consommations totales. Notons d'abord que les 4 premiers créneaux concernent des moteurs où la céramisation sera relativement importante en ce qui concerne le poids par unité, si elle se fait. Les estimés conservateurs situent actuellement à 10 lbs (4,54 kg) pour le diesel et à 20 lbs (9,08 kg) pour les turbines à gaz les poids des M.C.A. qui seront incorporés facilement si la céramisation se fait.

Avec l'hypothèse que 1/3 des camions et 1/7 des automobiles auront des moteurs diesels, et que la turbine à gaz sera utilisée dans un million de véhicules (700 000 camions et 300 000 automobiles), on est alors en mesure de dresser le tableau 4.4 qui donne une répartition des tonnages par marché pour l'estimé le plus probable. On calcule que pour cet estimé les véhicules à moteur à combustion interne contiendront en moyenne 3,26 lbs (1,48 kg) de M.C.A. par moteur. Cet estimé correspond à une consommation totale d'environ 136 000 tonnes courtes (123 350 tonnes).

La séquence de diffusion décrite ci-dessus a un échéancier difficile à prévoir, mais les conséquences quant au tonnage sont importantes.

Dans un échéancier lent qui atteindrait seulement les moteurs diesels dans les camions en l'an 2000, on obtient un tonnage de 43 000 tonnes courtes (39 000 tonnes). Notre estimé le plus pessimiste était à 33 900 tonnes courtes (30 750 tonnes) et correspond donc à une céramisation partielle du parc de camions diesels. À l'opposé, un échéancier rapide qui atteindrait tous les moteurs à combustion interne en l'an 2000 supposerait une céramisation de 4,48 lbs (2,03 kg) dans ces moteurs, pour obtenir l'estimé optimiste de 274 000 tonnes courtes (248 500 tonnes) de M.C.A. utilisées en l'an 2000.

Tableau 4.4 Répartition des tonnages de M.C.A. par marchés pour l'estimé le plus probable

	Types de moteurs			
	Diesel	Turbine à gaz	Combustion interne	Totaux
Parc céramisé (million) camions + autobus + véhicules militaires Automobiles	 4,3 6,2	 0,7 0,3	 8,0 37,0	 13,0 43,5
Degré de céramisation le plus probable	10 lbs (4,54 kg)	20 lbs (9,08 kg)	3,26 lbs (1,48 kg)	4,84 lbs (2,20 kg)
Tonnage de pièces de M.C.A. (tonnes courtes) (tonnes métriques)	52 500 (47 617)	10 000 (9 070)	73 500 (66 528)	135 850 (123 215)

Certains facteurs conditionnant cet échéancier sont évalués dans le tableau 4.8. Partant des usages prévus, il est possible de tirer des conclusions quant aux M.C.A. qui seront favorisés. Les résultats obtenus dans le tableau 4.5 mettent par ordre d'importance les choix qui se présentent selon les experts.

Au niveau des grandes classes, les céramiques monolithiques, les matériaux à matrice métallique et les revêtements céramiques des métaux sont considérés comme très importants. Les composites céramiques-céramiques sont par contre écartés pour l'an 2000.

Dans les céramiques monolithiques, on privilégie nettement le nitrure de silicium et les Sialons. Les zircones viennent ensuite essentiellement pour leur faible conductivité thermique et leur coefficient de dilatation proche des métaux, qui les rendent proprices à être utilisés dans le moteur diesel. Compte tenu de la séquence de développement identifiée précédemment, on peut considérer cette céramique comme importante à court terme.

Dans les matériaux à matrice métallique, on retient les composés SiC/Al et Al_2O_3/Al. Il faut signaler ici que le carbure de silicium SiC qui n'est pas retenu comme céramique monolithique est privilégié comme composite. De ce fait, il pourrait même devenir la céramique la plus utilisée quant au tonnage puisque son association avec l'aluminium augmente grandement sa résistance tout en préservant ses propriétés thermiques.

En recoupant les informations obtenues pour les parties céramisales et celles sur les créneaux avec les propriétés techniques des M.C.A., on est en mesure de dresser un tableau des pièces avec les tonnages de M.C.A. associés (tableau 4.6). En répartissant les différents M.C.A. pour chacune des pièces et chacun des moteurs, on est finalement à même d'obtenir les poids de M.C.A. avec leurs utilisations (tableau 4.7).

On obtient ainsi une production de 77 790 tonnes courtes (70 555 tonnes) de pièces en Si_3N_4 et Sialons, 23 590 tonnes courtes (21 300 tonnes) en Zr_2O_2 et 34 630 tonnes courtes (31 410 tonnes) en autres céramiques (SiC monolithique, matériaux à matrice métallique). Ces tonnages sont importants compte tenu des faibles rendements que l'on a actuellement pour la production des pièces à partir des poudres.

Tableau 4.5 Classes et sous-classes des M.C.A. considérées comme très importantes ou importantes

MARCHÉS ET MOTEURS	POURCENTAGE SELON LE GROUPE					
	Σ	E	A	C	R	I
CLASSES DE M.C.A.						
Considérées comme très importantes						
- Céramiques monolithiques denses	62	67	82	17	75	59
- Matériaux à matrice métallique	61	54	73	50	62	57
- Composites céramiques-céramiques	11	0	18	17	25	5
- Revêtement céramique des métaux	62	42	82	67	75	59
CÉRAMIQUES MONOLITHIQUES DENSES						
Considérées comme très importantes						
- Nitrure de silicium	63	82	64	20	86	57
- Sialons	67	82	64	40	86	62
Considérées comme importantes						
- Carbure de silicium	57	64	63	33	71	54
- Nitrure de silicium	96	100	100	80	100	95
- Sialons	91	100	91	80	100	89
- Zircones (PSZ, ZTA)	72	66	73	80	86	68
- L.A.S.	48	75	30	20	43	47
MATÉRIAUX À MATRICE MÉTALLIQUE						
Considérés comme très importants						
- SIC/Al	38	30	45	40	43	35
Considérés comme importants						
- SiC/Al	65	50	82	60	71	60
- Al_2O_3/Al	62	66	55	20	57	47

Tableau 4.6 Répartition des tonnages de M.C.A. par pièces et types de moteurs pour l'estimé le plus probable

Types de pièces	Types de moteurs						Totaux (tonnes)
	Diesel		Turbine à gaz		Combustion interne		
Pièces de frottements	5 lbs (2,27 kg)	Si_3N_4 (0,85) Sialons ZrO_2 (0,8) Autres (0,7)	5 lbs (2,27 kg)	Si_3N_4 (0,85) Sialons ZrO_2 (0,8) Autres (0,7)	1,1 lb (0,5 kg)	Si_3N_4 (0,85) Sialons ZrO_2 (0,8) Autres (0,7)	53 500 t.c. (48 525 t.)
Pièces chaudes	4 lbs (1,82 kg)	Si_3N_4 (0,50) Sialons ZrO_2 (0,40) Autres (0,10)	5 lbs (2,27 kg)	Si_3N_4 (0,50) Sialons ZrO_2 (0,40) Autres (0,10)	1,1 lb (0,5 kg)	Si_3N_4 (0,50) Sialons ZrO_2 (0,40) Autres (0,10)	48 250 t.c. (43 765 t.)
Rotors	1 lb (0,45 kg)	Si_3N_4 (0,90) Sialons Autres (0,10)	5 lbs (2,27 kg)	Si_3N_4 (0,90) Sialons Autres (0,10)	0,06 lb* (0,03 kg)	Si_3N_4 (1,0)	9 100 t.c. (8 255 t.)
Autres matériaux et autres applications	0 lb		5 lbs (2,27 kg)	Autres (1,0)	1,00 lb (0,45 kg)	Autres (1,0)	25 150 t.c. (22 805 t.)
	10 lbs (4,54 kg)		20 lbs (9,08 kg)		3.26 lbs (1,48 kg)		136 000 t.c. (123 350 t.)

* 0,06 lb (0,03 kg) est une moyenne par véhicule et non le poids d'un rotor.

- les calculs d'équivalence entre système métrique et système impérial sont arrondis.

Tableau 4.7 **Prévisions des tonnages de M.C.A. utilisés dans les moteurs en l'an 2000 (tonnes) pour l'estimé le plus probable**

Si_3N_4 + Sialons	77 790 t.c.	(70 555 t.)
dont . pièces de frottements	45 475 t.c.	(41 245 t.)
. pièces chaudes	24 125 t.c.	(21 880 t.)
. rotors	8 190 t.c.	(7 430 t.)
ZrO2	23 580 t.c.	(21 390 t.)
dont . pièces de frottements	4 280 t.c.	(3 885 t.)
. pièces chaudes	19 300 t.c.	(17 505 t.)
Autres (SiC, MMC, etc.)	34 630 t.c.	(31 485 t.)
dont . pièces de frottements	3 745 t.c.	(3 395 t.)
. pièces chaudes	4 825 t.c.	(4 380 t.)
. rotors	910 t.c.	(825 t.)
. autres applications	25 150 t.c.	(22 805 t.)

Tableau 4.8 Importance des différents facteurs conditionnant la pénétration des M.C.A. dans les moteurs

FACTEURS PAR DEGRÉ D'IMPORTANCE	POURCENTAGE SELON LE GROUPE					
	Σ	E	A	C	R	I
TRÈS IMPORTANT						
- Procédés de production de pièces	90	92	92	86	89	91
- Contrôle de qualité des pièces	90	92	92	86	89	91
- Concurrence des matériaux actuels	64	42	83	71	67	61
IMPORTANT						
- Concurrence des matériaux actuels	89	83	92	86	100	82
- Technologie de supports (réparations)	75	58	83	86	78	73
- Procédés de production des pièces	100	100	100	100	100	100
- Contrôle de qualité des pièces	97	100	100	86	100	96
MODÉRÉMENT IMPORTANT						
- Normes de contrôle de la pollution	74	74	66	85	66	78

Interprétation du tableau: 90 % des experts considèrent les procédés de production comme importants et 100 % les considèrent comme importants ou très importants.

Cet aspect est retenu par les experts lorsqu'on leur demande quels seront les facteurs qui conditionneront la pénétration des M.C.A. dans les moteurs (tableau 8). Ils placent les procédés de production des pièces et le contrôle de qualité comme des éléments très importants. On constate également que les principales contraintes à lever proviennent du domaine de la technologie des céramiques plutôt que de l'environnement.

En effet, parmi les facteurs externes, seul la concurrence des matériaux actuels est considérée comme très importante et encore: elle est placée derrière les problèmes de procédés et ceux de contrôle de qualité, et il y a une profonde divergence entre experts européens et américains. Les Européens ne considèrent pas majoritairement cette concurrence comme très importante.

Ceci est conforme à l'évolution technologique observée actuellement dans l'utilisation des matériaux. L'optimisation de l'efficacité du design impose que l'on choisisse pour chaque fonction spécifique un matériau qui aura des qualités appropriées à un niveau souvent élevé (température, résistance, conductivité). Aucun matériau ne possède toutes les propriétés aux niveaux requis. La gamme des matériaux est donc une contrainte au design du produit. La mise au point de nouveaux matériaux en grand nombre permet d'élargir cette contrainte et entraîne une plus grande diversité dans les matériaux composant les produits. Ce phénomène est connu sous le nom de substitution diversifiée des matériaux.

Au plan théorique, les M.C.A. ont des propriétés intrinsèques supérieures aux métaux pour certains usages à haute température. Il est dès lors assuré que lorsque les problèmes technologiques de la fabrication des M.C.A. seront résolus, ils domineront leurs concurrents immédiats pour ces usages spécifiques. L'attention doit donc se porter sur les développements techniques dans le domaine des M.C.A. plutôt que sur les améliorations des matériaux traditionnels.

D'autres facteurs externes à la céramisation des moteurs ont été considérés. Les problèmes de pollution (émission de NO_x et rejets de gaz d'échappement à plus haute température) semblent sous contrôle, de l'avis des experts. De même, les estimés faits ici reposent sur un scénario de hausse modérée des prix

du pétrole d'ici la fin du siècle. Les conséquences d'autres hypothèses sur ce paramètre peuvent être évaluées en changeant d'échéancier de la séquence de céramisation. Il est toutefois encore important de souligner que les experts ne voient pas là des contraintes à la céramisation et qu'ils insistent d'abord sur la solution des problèmes de production des poudres et des pièces de M.C.A.

5. CONCLUSIONS

Cette enquête a permis de dégager les principaux points suivants pour l'an 2000:

- Il est à 90 % sûr que des pièces particulières des moteurs à combustion pour véhicules seront fabriquées en céramique plutôt qu'en acier ou en acier allié, sur une échelle commerciale.

- Les contraintes à la pénétraton des M.C.A. dans les moteurs sont technologiques. Dès que ces contraintes seront levées, leur supériorité intrinsèque sur les métaux les imposera dans les usages où l'usure ou la température sont des paramètres contraignants.

- La projection la plus probable est que la consommation des céramiques sera de l'ordre de 136 000 tonnes courtes (123 350 tonnes métriques) par an. Les classes de matériaux qui domineront seront celles des nitrures de silicium Si_3N_4, des sialons et des zircones.

Les conclusions qui peuvent être tirées de cette évolution sont significatives dans plusieurs industries au Québec. En premier lieu, dans la production de poudres céramiques, qui est très énergivore.

ANNEXE A

LISTE DES PARTICIPANTS À L'ENQUÊTE

LISTE NON ORDONNÉE DES PARTICIPANTS À L'ENQUÊTE DELPHI

I. Experts canadiens

Dr. R.S. Webb
Alcan Aluminum Limited
Montreal

Kamal el Assal
Almax Industries Limited
Lindsay, Ontario

Robert McEwen
EYC Industries Ltd
Lindsay, Ontario

Dr. A. Bell
INCO Limited
Toronto, Ontario

Alain Lévesque
Ministry of State for Science
and Technology
Ottawa, Ontario

Peter McGeer
Alcan International Ltd
Kingston, Ontario

Pham Phy Ngoc
Ministère de l'industrie et du commerce
Québec, Québec

W. Rogers
ESSO Petroleum Technical Research Centre
Sarnia, Ontario

Keith Linger
Fiberglas Canada Inc.
Sarnia, Ontario

K. Tandon, P. Eng
Manitoba Research Council
Winnipeg, Manitoba

II. Experts américains

E.L. Long, Jr.
Oak Ridge Nat'l Laboratory
Oak Ridge

M.L. J. Vallon
Norton Co.
Northboro, MA

Sam J. Schneider
Nat'l Bureau of Standards
Gaithersburgh, MD

C.S. Yust
Oak Ridge National Laboratory
TN, USA

Robert P.Larsen
Argonne National Laboratory
Argonne, IL

Dr. Gordon Love
Sprague Electric
North Adams, MA

Wirth David
Coors Porcelain Company 17750 West
Golden, Colorado

Alan Hart
Central Research Dow Chemical
Midland, MI.

Thomas J. Carbone
Alcoa Chemincals Division
Pittsburgh, PA

Robert W. Lashway
Standard Oil Engineered
Materials Co.
Niagara Fall, NY

David J. Clough
Magnesium Elektron Inc.
Flemington, New Jersey

Dr. Ralph E. Funer
ICI Americas Inc.
Wilmongton, Delaware

Roger S. Storm, Ph.D.
Standard Oil
Engineered Materials Company
Niagara Falls, New York

Anonyme
Oak Ridge National
Laboratory

Dr. Sheldon E. Isakoff, Director
E.I. DuPont de Nemours and Co.
Wilmongton, DE

Dr. R. Nathan Katz
Army Materials Technology Laboratory
Watertown, MA

Dr. J.C. Harding
Cabor Corporation Billercia Technical Center
Massachusetts

Dr. A.F. McLean
Ford Motor Company
Dearborn Michigan

R.B. Shulz
U.S. Dept. of Energy
Washington, D.C.

III. Experts européens

Dr. D. Broussaud
École nationale supérieure des mines de Paris
Evry, France

Dr. J.R. Dower
Department of Trade and Industry
National Engineering Laboratory
Glasgow, Un. Kingdom

Anonyme
Groupe Pechiney
France

Anonyme
I.H. Daimler-Benz AG
West Germany

Dr. G. Desplanches
Renault/Dast
Boulogne Billancourt
France

Dr. Edwin Erben
Man-Advanced Technology
Germany

Dr. C.F. Cooper
Morgan Thermic Limited
Stourport-on-Severn, Worcs.
England

Dr. H.K. Ziener
Stuttgart 1
F.R. Germany

Dr. J. Hartwig
Krupp Forschungsinstitut. Essen 1
F.R. Germany

Dr. Ludwing Gauckler
Swiss Aluminum Ltd.
Neuhausen am Rheinfall
Switzerland

Bergstrom Magnus
Saab-Scania, Scania
Sodertalje
Sweden

Dr. I.M. Buckley-Golder
Harwell Laboratory
Oxfordhire
England

Gérald Grosshans
Alsthom Center
Saint-Denis, France

Professor Philippe Boch
École nationale supérieur de
céramique industrielle (ENSCI)
Limoges, France

Dr. Hans-Dieter Dannohl
BMW AG
Munchen, Germany

Alain Auriol
CERAVER
Paris, France

M.J. Miles
Magnesium Elektron Limited
Twickenham, England

Dr. Ing. Detlef Steinmann
Kempten, Germany

ANNEXE B

QUESTIONNAIRE DE L'ENQUÊTE AVEC INTERVALLES INTERQUARTILES DES RÉPONSES DE LA RONDE 1 ET RÉSULTATS FINAUX

Note 1. Cette annexe présente l'évolution de l'information statistique pour chaque question, lors de l'enquête :

i) étape 1 - questionnaire vierge,
ii) étape 2 - questionnaire avec intervalles interquartiles,
iii) étape 3 - résultats finaux retournés aux experts.

Note 2. Cette annexe étant une copie des documents de travail originaux, elle n'est donc pas traduite.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

"TECHNOLOGICAL FORECASTING"
Course MU-645

Prof. M. Rigaud and Prof. D. Leblanc
École Polytechnique
Campus Université de Montréal
Montréal, P.Q.
Canada, H3C 3A7

ANSWERS TO
DELPHI QUESTIONNAIRE

".....ON THE USE OF ADVANCED CERAMIC MATERIALS IN SURFACE VEHICLES BY THE YEAR 2000 ....

August 1987

B. Supporting technologies (such as testing, maintenance repairing...)?

Answer, round 2

0 ☐ Not important at all

1 ☐ Of little importance

2 ☐ Moderately important

3 ◉ Important (frequency: 52%)

4 ☐ Very important

C. Processing techniques?

Answer, round 2

0 ☐ Not important at all

1 ☐ Of little importance

2 ☐ Moderately important

3 ☐ Important

4 ◉ Very important (frequency: 90%)

D. Life prediction, methodology to insure reliability in service?

Answer, round 2

0 ☐ Not important at all

1 ☐ Of little importance

2 ☐ Moderately important

3 ☐ Important

4 ◉ Very important (frequency: 90%)

QUESTION I (WARM-UP QUESTIONS)

I.1 Do you think that advanced ceramic materials will, sooner or later, before 2000, compete directly with metals and alloys that are presently in use in surface vehicles.

Answer, round 2:

0 ☐ Highly unlikely

1 ☐ Only in rare cases

2 ☑ On some cases (frequency: 90%)

3 ☐ Probably

4 ☐ Certainly

I.2 At horizon 2000, how important are the following factors, to insure the commercialization of the advanced ceramic materials in the transport industry, estimate the importance of following factors, considering the results of round 1.

A. Improved composition and performance of competing materials?

Answer, round 2

0 ☐ Not important at all

1 ☐ Of little importance

2 ☐ Moderately important

3 ☐ Important

4 ☑ Very important (frequency: 65%)

E. Pollution control norms in regard to NOx emission?

Answer, round 2

0 ☐ Not important at all

1 ☐ Of little importance

2 ◉ Moderately important (frequency: 52%)

3 ☐ Important

4 ☐ Very important

QUESTION II (THE NATURE OF THE ADVANCED MATERIALS TO BE IN USE)

RANK THE IMPORTANCE OF THE FOLLOWING CLASSES AND SUBCLASSES OF MATERIALS TO BE EVENTUALLY USED IN SURFACE VEHICLES.

Rank using scale 0 to 10:
0 not important ; the material will very unlikely be used;
10 very important; the material will definitely be used in all surface vehicles.

		Round 1 1990 (IQR)	Round 2 Answer Mode	Frequency	Round 1 2000 (IQR)	Round 2 Answer Mode	Frequency
BY CLASS FIRST							
1	Dense monolithic Ceramic Body	[0 - 5]	3	(48%)	[5 - 10]	10	(62%)
2	Metal Matrix Composites	[0 - 5]	5	(46%)	[5 - 10]	10	(61%)
3	Ceramic - Ceramic Composites	[0 - 3]	3	(41%)	[3 - 5]	3	(61%)
4	Ceramic Coating on Metals	[0 - 5]	5	(57%)	[5 - 10]	10	(52%)
BY SUB-CLASSES							
5	Silicon Carbides	[0 - 5]	3	(56%)	[3 - 5]	5	(46%)
6	Silicon Nitrides	[3 - 5]	5	(48%)	[5 - 10]	10	(63%)
7	SiAlons	[3 - 5]	5	(48%)	[5 - 10]	10	(67%)
8	Zirconias (PSZ, ZTA etc)	[0 - 5]	3	(54%)	[3 - 5]	5	(54%)
9	L.A.S.	[0 - 5]	3	(46%)	[0 - 5]	3-5	(37%)
10	Aluminium based MMC	[0 - 5]	3	(42%)	[3 - 5]	4	(40%)
11	SiC / Al MMC	[0 - 5]	3	(41%)	[3 - 8]	10	(39%)
12	BorC / Al MMC	[0 - 3]	0-3	(48%)	[0 - 3]	3	(56%)
13	Al_2O_3 / Al MMC	[0 - 5]	3	(58%)	[3 - 5]	3	(44%)
14	Titanium based MMC	[0 - 0]	0	(91%)	[0 - 3]	0	(52%)
15	SiC/SiC	[0 - 3]	0	(72%)	[0 - 3]	3	(64%)
16	SiC/Al_2O_3	[0 - 3]	0	(60%)	[3 - 5]	3	(60%)
17	Other ceramics-ceramics composites	[0 - 3]	0	(52%)	[3 - 5]	3	(52%)

QUESTION III

3.1 For military vehicles give the probability (0% to 100%), to find a minimum of 5 pounds (≃ 2 kg) of ceramics in 1990, in 1995, in 2000 for the following engines.

3.1: FOR MILITARY VEHICLES

	In 1990		In 1995		In 2000		Beyond	
	IQR Round 1	Ans. Round 2 Mode Freq.	IQR Round 1	Ans. Round 2 Mode Freq.	IQR Round 1	Ans. Round 2 Mode Freq.	IQR Round 1	Ans. Round 2 Mode Freq.
1. Internal combustion gasoline	[0%-10%]	0-5%(48%)	[5%-50%]	10%(33%)	[10%-50%]	25%(44%)	[25%- 95%]	50%(42%)
2. Alternative fuels	[0%- 5%]	0% (55%)	[0%-25%]	0%(35%)	[5%-50%]	5%(38%)	[25%- 75%]	50%(50%)
3. Diesel (adiabatic)	[0%-10%]	5% (40%)	[10%-50%]	25%(33%)	[50%-90%]	50%(55%)	[50%-100%]	75%(37%)
4. Gas turbine	[0%-15%]	0% (37%)	[5%-25%]	25%(44%)	[10%-75%]	25%(32%)	[50%- 95%]	50%(46%)
5. Stirling motors	[0%- 0%]	0%(100%)	[0%-10%]	0%(72%)	[5%-50%]	5%(47%)	[5%- 50%]	5-10%(26%)

QUESTION III (continues)

3.2 For buses and trucks give the probability (0% to 100%), to find a minimum of 5 pounds (≃ 2 kg) of ceramics in 1990, in 1995, in 2000 for the following engines.

3.2: FOR BUSES AND TRUCKS

	In 1990		In 1995		In 2000		Beyond	
	IQR Round 1	Ans. Round 2 Mode Freq.	IQR Round 1	Ans. Round 2 Mode Freq.	IQR Round 1	Ans. Round 2 Mode Freq.	IQR Round 1	Ans. Round 2 Mode Freq.
1. Internal combustion gasoline	[0%-10%]	0% (67%)	[5%-50%]	5%(44%)	[10%-90%]	10%(37%)	[25%-100%]	25%(37%)
2. Alternative fuels	[0%- 0%]	0% (90%)	[0%-25%]	0%(43%)	[0%-50%]	5%(38%)	[5%- 75%]	5%(32%)
3. Diesel (adiabatic)	[0%-10%]	5% (40%)	[5%-50%]	10%(38%)	[25%-75%]	50%(38%)	[50%-100%]	50%(50%)
4. Gas turbine	[0%- 0%]	0% (91%)	[0%-25%]	0%(54%)	[5%-50%]	5%(35%)	[10%-100%]	25%(35%)
5. Stirling motors	[0%- 0%]	0%(100%)	[0%- 5%]	0%(88%)	[0%-25%]	0%(47%)	[5%- 50%]	10%(42%)

QUESTION III (continues)

3.3 For cars give the probability (0% to 100%), to find a minimum of 5 pounds (≈ 2 kg) of ceramics in 1990, in 1995, in 2000 for the following engines.

3.3: FOR CARS

	In 1990 IQR Round 1	Ans. Round 2 Mode Freq.	In 1995 IQR Round 1	Ans. Round 2 Mode Freq.	In 2000 IQR Round 1	Ans. Round 2 Mode Freq.	Beyond IQR Round 1	Ans. Round 2 Mode Freq
1. Internal combustion gasoline	[0%- 5%]	0% (73%)	[5%-25%]	5%(38%)	[10%-50%]	25%(42%)	[25%-90%]	50%(42%
2. Alternative fuels	[0%- 0%]	0% (95%)	[0%-10%]	0%(54%)	[0%-25%]	0%(35%)	[10%-50%]	25%(35%
3. Diesel (adiabatic)	[0%-10%]	0% (61%)	[0%-50%]	25%(33%)	[0%-50%]	50%(33%)	[25%-75%]	50%(37%
4. Gas turbine	[0%- 0%]	0% (95%)	[0%-10%]	0%(52%)	[0%-25%]	0%(33%)	[25%-75%]	25%(37%
5. Stirling motors	[0%- 0%]	0%(100%)	[0%- 5%]	0%(83%)	[0%-10%]	0%(67%)	[0%-50%]	25%(32%

QUESTION IV

RANK BY PROBABILITY OF SUCCESS THE FOLLOWING APPLICATIONS FORESEEN FOR ADVANCED CERAMIC MATERIALS IN SURFACE VEHICLES (AT THE COMMERCIALIZATION STAGE).

Use the following code - 0 Never, 2 Low probability, 3 Fifty-fifty
4 High probability, 5 Definitely

	IN 1990			IN 2000		
	ROUND 1 (IQR)	ROUND 2 Mode	Freq.	ROUND 1 (IQR)	ROUND 2 Mode	Freq.
Structural applications						
In gas turbine						
1. Combustion area	[1 - 3]	2	(50%)	[3 - 4]	4	(46%)
2. Turbine components (stator, rotor, blades)	[1 - 4]	2	(41%)	[2 - 5]	4	(41%)
3. Regenerators	[1 - 3]	2	(41%)	[3 - 5]	3	(28%)
4. Bearing and seals	[1 - 3]	3	(41%)	[3 - 5]	4-5	(34%)
In reciprocating engine (Gasoline and diesel)						
5. Adiabatic components (pistons, liners, heads, valves, rotors)	[1 - 3]	2	(55%)	[3 - 4]	3	(66%)
6. Auxiliary (manifold, turbocharger rotors, particulate traps or filters)	[2 - 4]	2-3	(38%)	[4 - 4]	4	(76%)
7. Wear parts (valve train, wrist pins)	[2 - 3]	3	(52%)	[4 - 5]	4	(52%)
In Stirling						
8. Combustion area	[1 - 3]	1	(58%)	[2 - 4]	2	(58%)
9. Heat transfer	[1 - 3]	1	(58%)	[2 - 4]	2	(53%)
Functional applications (in any vehicles)						
10. Combustion control gas-sensors (O_2, CO_2)	[3 - 5]	4	(45%)	[5 - 5]	5	(83%)
11. Glow plugs	[2 - 4]	4	(48%)	[4 - 5]	5	(69%)
12. Catalytic converters	[4 - 5]	5	(52%)	[5 - 5]	5	(83%)
13. Battery-systems (β''. Al_2O_3)	[0 - 2]	0	(46%)	[5 - 3]	3	(42%)

QUESTION V

IN WHAT YEAR DO YOU FORESEE THAT AT LEAST THE FOLLOWING QUANTITIES OF CERAMIC MATERIALS WILL BE USED IN THE COMMON SURFACE VEHICLES (STRUCTURAL AND FUNCTIONAL PARTS INCLUDED, SPARKS PLUGS ALREADY IN USE EXCLUDED).

YEAR

		More than 1 pound of ceramic material	More than 5 pounds of ceramic material	More than 10 pounds of ceramic material	More than 20 pounds of ceramic material
OPTIMISTIC ESTIMATE	IQR 1rd ..... Answer 2rd	[1990 - 1990] Mode Freq. 1990 70%	[1995 - 2000] Mode Freq. 1995 (43%) 2000 (43%)	[1995 - 2000] Mode Freq. 2000 (71%)	[2000 - 2010] Mode Freq. 2010 (71%)
MOST LIKELY HOOD ESTIMATE	IQR 1rd ..... Answer 2rd	[1995 - 1995] Mode Freq. 1995 (75%)	[1995 - 2000] Mode Freq. 2000 (67%)	[2000 - 2010] Mode Freq. 2020 (58%)	[2000 - 2030] Mode Freq. 2020 (50%)
PESSIMISTIC ESTIMATE	IQR 1rd ..... Answer 2rd	[1995 - 2000] Mode Freq. 2000 (70%)	[2000 - 2010] Mode Freq. 2010 (55%)	[2005 - 2020] Mode Freq. 2020 (65%)	[2010 - 2200] Mode Freq. 2200 (67%)

QUESTION VI: Pollution barrier

DO YOU FORESEE THAT USING CERAMIC MATERIALS, ALLOWING ENGINE TO RUN AT HIGHER TEMPERATURES, WOULD CREATE A NEW POLLUTION PROBLEM: GENERATION OF NO_x AT UNACCEPTABLE LEVEL?

The answer in round 2 is:

NO (freq. 64%)

ANNEXE C: RÉSULTATS FINAUX DÉTAILLÉS

- les résultats sont présentés sous forme de fréquences des réponses pour l'ensemble des experts.

- les auteurs tiennent à la disposition du lecteur intéressé les fréquences par classes d'experts.

QUESTION No 1: QUESTIONS GENERALES SUR LES OPPORTUNITES ET CONTRAINTES

evaluations	1.1 ceram. avanc.	1.2a amelio. perfor.	1.2b techn. support	1.2c techn. trait.	1.2d predic. vie	1.2e contr. pollut.
0 (tres improbable)	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
1 (rares occasions)	6.7%	6.5%	3.2%	0.0%	0.0%	25.8%
2 (quelques cas)	90.0%	6.5%	22.6%	0.0%	3.2%	51.6%
3 (probablement)	3.3%	22.6%	51.6%	9.7%	6.5%	19.4%
4 (certainement)	0.0%	64.5%	22.6%	90.3%	90.3%	3.2%

QUESTION No 2: IMPORTANCE DES DIFFERENTES CLASSES DE CERAMIQUES

evaluations	2.1 monolithiq.		2.2 comp.mat.met.		2.3 comp.cer.cer.		2.4 recouvr.cer.		2.5 carb.silicium		2.6 nitr.silicium	
	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000
0 (pas important)	10.3%	0.0%	17.9%	0.0%	37.0%	0.0%	7.1%	0.0%	18.5%	0.0%	0.0%	0.0%
3	48.3%	6.9%	35.7%	7.1%	40.7%	60.7%	35.7%	10.3%	55.6%	42.9%	44.4%	3.7%
5	34.5%	31.0%	46.4%	32.1%	22.2%	28.6%	57.1%	27.6%	25.9%	46.4%	48.1%	33.3%
10(tres important)	6.9%	62.1%	0.0%	60.7%	0.0%	10.7%	0.0%	62.1%	0.0%	10.7%	7.4%	63.0%

QUESTION No 2: IMPORTANCE DES DIFFERENTES CLASSES DE CERAMIQUES (suite)

evaluations	2.7 SiAlons		2.8 zircone		2.9 L.A.S.		2.10 m.m.c.base Al.		2.11 m.m.c.SiC/Al		2.12 m.m.c.BorC/Al	
	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000
0 (pas important)	3.7%	3.7%	14.3%	0.0%	26.9%	14.8%	23.1%	4.0%	25.9%	7.7%	48.1%	36.0%
3	40.7%	3.7%	53.6%	28.6%	46.2%	37.0%	42.3%	24.0%	40.7%	26.9%	48.1%	56.0%
5	48.1%	25.9%	28.6%	53.6%	26.9%	37.0%	30.8%	40.0%	33.3%	26.9%	3.7%	4.0%
10(tres important)	7.4%	66.7%	3.6%	17.9%	0.0%	11.1%	3.8%	32.0%	0.0%	38.5%	0.0%	4.0%

QUESTION No 2: IMPORTANCE DES DIFFERENTES CLASSES DE CERAMIQUES (suite et fin)

evaluations	2.13 m.m.c.Al2O3/Al		2.14 m.m.c.base Ti		2.15 SiC/SiC		2.16 SiC/Al2O3		2.17 autres ceram.	
	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000
0 (pas important)	23.1%	4.0%	90.5%	52.4%	72.0%	32.0%	60.0%	8.0%	52.0%	4.0%
3	57.7%	44.0%	9.5%	42.9%	28.0%	64.0%	36.0%	60.0%	40.0%	52.0%
5	15.4%	32.0%	0.0%	4.8%	0.0%	4.0%	4.0%	28.0%	8.0%	32.0%
10(tres important)	3.8%	20.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.0%	0.0%	12.0%

QUESTION No 3: PROBABILITE D'UTILISER 5 KG.DE CERAMIQUES, PAR TYPE DE MOTEUR ET DE MARCHE (MILITAIRE, CAMION, AUTOMOBILES)

VEH.MILITAIRES	3.1:comb. interne essence				3.1:combustibles alternat.				3.1:diesel adiabatique			
prob.	1990	1995	2000	apres	1990	1995	2000	apres	1990	1995	2000	apres
0 %	48.0%	8.3%	0.0%	0.0%	55.0%	35.0%	0.0%	0.0%	32.0%	3.7%	0.0%	0.0%
5 %	48.0%	29.2%	12.0%	8.3%	40.0%	20.0%	38.1%	5.0%	40.0%	3.7%	0.0%	0.0%
10 %	4.0%	33.3%	24.0%	8.3%	5.0%	30.0%	14.3%	5.0%	28.0%	29.6%	0.0%	0.0%
25 %	0.0%	16.7%	44.0%	25.0%	0.0%	10.0%	33.3%	30.0%	0.0%	33.3%	14.8%	8.3%
50 %	0.0%	12.5%	16.0%	41.7%	0.0%	5.0%	9.5%	50.0%	0.0%	29.6%	55.6%	20.8%
75 %	0.0%	0.0%	0.0%	4.2%	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%	0.0%	0.0%	14.8%	37.5%
90 %	0.0%	0.0%	4.0%	8.3%	0.0%	0.0%	4.8%	0.0%	0.0%	0.0%	14.8%	20.8%
95 %	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
100%	0.0%	0.0%	0.0%	4.2%	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%	0.0%	0.0%	0.0%	12.5%

VEH.MILITAIRES	3.1:turbine a gaz				3.1:moteur Stirling			
prob.	1990	1995	2000	apres	1990	1995	2000	apres
0 %	37.5%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	72.2%	10.5%	10.5%
5 %	25.0%	36.0%	0.0%	0.0%	0.0%	22.2%	47.4%	26.3%
10 %	25.0%	16.0%	20.0%	0.0%	0.0%	5.6%	26.3%	26.3%
25 %	12.5%	44.0%	32.0%	8.3%	0.0%	0.0%	15.8%	21.1%
50 %	0.0%	4.0%	28.0%	45.8%	0.0%	0.0%	0.0%	15.8%
75 %	0.0%	0.0%	12.0%	25.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
90 %	0.0%	0.0%	4.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
95 %	0.0%	0.0%	4.0%	4.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
100%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

CAMIONS	3.2:comb. interne essence				3.2:combustibles alternat.				3.2:diesel adiabatique			
prob.	1990	1995	2000	apres	1990	1995	2000	apres	1990	1995	2000	apres
0 %	66.7%	4.0%	0.0%	0.0%	90.0%	42.9%	19.0%	0.0%	36.0%	3.8%	0.0%	0.0%
5 %	20.8%	44.0%	12.5%	12.5%	10.0%	38.1%	38.1%	31.8%	40.0%	19.2%	0.0%	0.0%
10 %	12.5%	28.0%	37.5%	4.2%	0.0%	14.3%	14.3%	22.7%	24.0%	38.5%	15.4%	4.2%
25 %	0.0%	16.0%	20.8%	37.5%	0.0%	4.8%	23.8%	13.6%	0.0%	26.9%	26.9%	12.5%
50 %	0.0%	8.0%	20.8%	29.2%	0.0%	0.0%	4.8%	27.3%	0.0%	7.7%	38.5%	50.0%
75 %	0.0%	0.0%	4.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	11.5%	12.5%
90 %	0.0%	0.0%	4.2%	12.5%	0.0%	0.0%	0.0%	4.5%	0.0%	3.8%	7.7%	12.5%
95 %	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.2%
100%	0.0%	0.0%	0.0%	4.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.2%

CAMIONS	3.2:turbine a gaz				3.2:moteur Stirling			
prob.	1990	1995	2000	apres	1990	1995	2000	apres
0 %	90.9%	54.5%	0.0%	0.0%	100.0%	88.2%	47.4%	5.3%
5 %	4.5%	22.7%	34.8%	4.3%	0.0%	11.8%	36.8%	26.3%
10 %	0.0%	18.2%	21.7%	21.7%	0.0%	0.0%	5.3%	42.1%
25 %	4.5%	0.0%	26.1%	34.8%	0.0%	0.0%	10.5%	10.5%
50 %	0.0%	4.5%	13.0%	13.0%	0.0%	0.0%	0.0%	15.8%
75 %	0.0%	0.0%	4.3%	4.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
90 %	0.0%	0.0%	0.0%	13.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
95 %	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
100%	0.0%	0.0%	0.0%	8.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

QUESTION No 3: PROBABILITE D'UTILISER 5 KG.DE CERAMIQUES, PAR TYPE DE MOTEUR ET DE MARCHE (MILITAIRE, CAMION, AUTOMOBILES) -suite et fin.

AUTOMOBILES	3.3:comb. interne essence				3.3:combustibles alternat.				3.3:diesel adiabatique			
prob.	1990	1995	2000	apres	1990	1995	2000	apres	1990	1995	2000	apres
0 %	73.1%	7.7%	3.8%	0.0%	95.2%	54.5%	34.8%	0.0%	61.5%	18.5%	11.1%	0.0%
5 %	23.1%	38.5%	7.7%	11.5%	4.8%	31.8%	26.1%	21.7%	30.8%	18.5%	3.7%	7.4%
10 %	3.8%	30.8%	23.1%	0.0%	0.0%	4.5%	26.1%	26.1%	3.8%	18.5%	14.8%	3.7%
25 %	0.0%	19.2%	42.3%	23.1%	0.0%	9.1%	13.0%	34.8%	3.8%	33.3%	29.6%	18.5%
50 %	0.0%	3.8%	23.1%	42.3%	0.0%	0.0%	0.0%	17.4%	0.0%	7.4%	33.3%	37.0%
75 %	0.0%	0.0%	0.0%	7.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.7%	0.0%	14.8%
90 %	0.0%	0.0%	0.0%	15.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.7%	11.1%
95 %	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.7%	3.7%
100%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.7%

AUTOMOBILES	3.3:turbine a gaz				3.3:moteur Stirling			
prob.	1990	1995	2000	apres	1990	1995	2000	apres
0 %	95.5%	52.2%	33.3%	0.0%	100.0%	83.3%	66.7%	21.1%
5 %	0.0%	34.8%	8.3%	12.5%	0.0%	16.7%	22.2%	21.1%
10 %	0.0%	8.7%	25.0%	4.2%	0.0%	0.0%	11.1%	15.8%
25 %	4.5%	0.0%	25.0%	37.5%	0.0%	0.0%	0.0%	31.6%
50 %	0.0%	4.3%	4.2%	29.2%	0.0%	0.0%	0.0%	10.5%
75 %	0.0%	0.0%	4.2%	4.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
90 %	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
95 %	0.0%	0.0%	0.0%	4.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
100%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

QUESTION No 4: PROBABILITE D'UTILISER DES CERAMIQUES DANS DIFFERENTES PARTIES DU MOTEUR

	4.1a controle		4.1b comb.		4.1c bougies		4.1d allum.		4.1e conv.catalyt.		4.1f syst.		4.1g batteries	
evaluations	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000	1990	2000
0 (jamais)	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	46.2%	3.8%		
1 (tres faible prob.)	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	26.9%	15.4%		
2 (faible probab.)	3.4%	0.0%	17.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	26.9%	23.1%		
3 (moitie-moitie)	24.1%	0.0%	17.2%	0.0%	6.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	42.3%		
4 (forte probab.)	44.8%	17.2%	48.3%	31.0%	41.4%	17.2%	0.0%	11.5%						
5 (certainement)	27.6%	82.8%	17.2%	69.0%	51.7%	82.8%	0.0%	3.8%						

QUESTION No 5: PREVISION DE L'INTENSITE D'UTILISATION DES CERAMIQUES DANS LES VEHICULES COURANTS (1lb.,5lb.,10lb.,20lb.)

	5.1 estimation optimiste				5.2 estime le plus probable				5.3 estime pessimiste			
estime	1 lb.	5 lb.	10 lb.	20 lb.	1 lb.	5 lb.	10 lb.	20 lb.	1 lb.	5 lb.	10 lb.	20 lb.
1987	8.7%	0.0%	0.0%	0.0%	4.3%	0.0%	0.0%	0.0%	4.3%	0.0%	0.0%	0.0%
1990	69.6%	4.3%	0.0%	0.0%	13.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
1995	17.4%	43.5%	9.5%	0.0%	73.9%	9.5%	0.0%	0.0%	21.7%	0.0%	0.0%	0.0%
2000	4.3%	43.5%	71.4%	11.8%	8.7%	66.7%	15.8%	0.0%	69.6%	9.1%	0.0%	0.0%
2005	0.0%	0.0%	4.8%	11.8%	0.0%	4.8%	10.5%	0.0%	4.3%	18.2%	0.0%	0.0%
2010	0.0%	8.7%	4.8%	70.6%	0.0%	9.5%	57.9%	12.5%	0.0%	54.5%	20.0%	0.0%
2020	0.0%	0.0%	4.8%	0.0%	0.0%	9.5%	10.5%	50.0%	0.0%	4.5%	65.0%	13.3%
2030	0.0%	0.0%	4.8%	5.9%	0.0%	0.0%	0.0%	25.0%	0.0%	4.5%	0.0%	20.0%
2200(jamais)	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.3%	12.5%	0.0%	9.1%	15.0%	66.7%

QUESTION No 6: CONTRAINTE DUE A LA POLLUTION

reponses	problemes de pollution
non	64.3%
oui	35.7%

Gouvernement du Québec
Ministère
des Transports

93-04